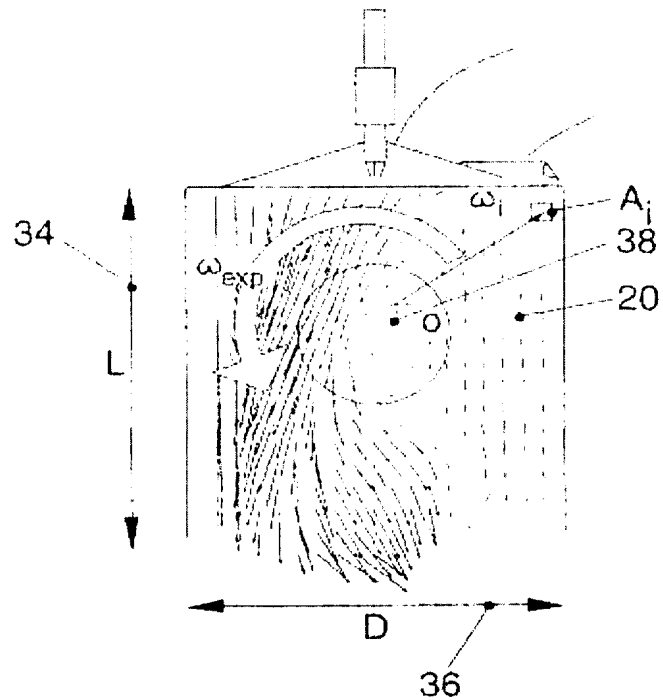


Abstract of **DE 10038460 (A1)**

Translate this text

A fluid flow sensor uses Particle Image Velocimetry to plot the vector flow (20) of fluids such as the charge in an engine cylinder with data processing to determine the real center of turbulent rotation (38).



Data supplied from the **espacenet** database — Worldwide

**19 BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND**

**DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT**

**Offenlegungsschrift**  
**DE 100 38 460 A 1**

Int. Cl.<sup>7</sup>:  
**G 01 P 5/18**  
G 01 N 11/14

21 Aktenzeichen: 100 38 460.9  
 22 Anmeldetag: 7. 8. 2000  
 43 Offenlegungstag: 21. 2. 2002

DE 100 38 460 A 1

⑦1 Anmelder:  
Volkswagen AG, 38440 Wolfsburg, DE

**(72) Erfinder:**  
Freek, Carsten, 38106 Braunschweig, DE; Raposo,  
Jorge, 38106 Braunschweig, DE; Bensler, Henry,  
Dr., 38518 Gifhorn, DE

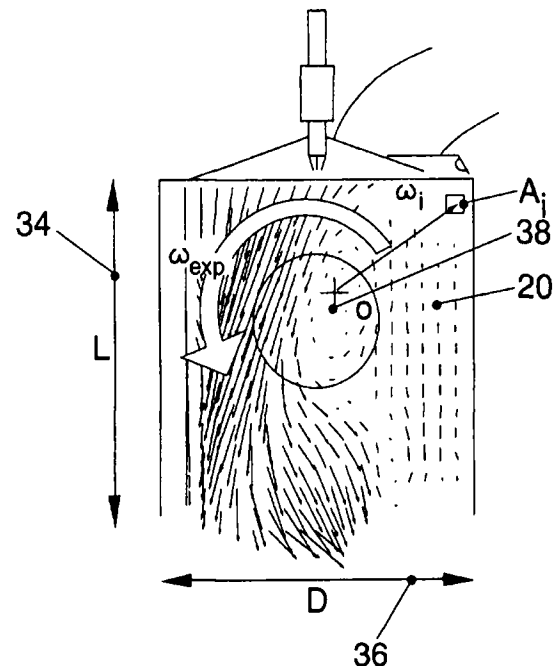
⑤⑥ Für die Beurteilung der Patentfähigkeit in Betracht zu ziehende Druckschriften:

GLANZ,Reinhard: Differentielle Erfassung von  
Tumble-Strömungsfeldern. In: MTZ -  
Motortechnische  
Zeitschrift 61, 2000, 1, S.40-45;  
GROSJEAN,N., et.al.: Combining LDA and PIV for  
turbulence measurements in unsteady swirling  
flows. In: Meas. Sci. Technol.8, 1997, S.1523-  
S.1532;  
MENG,Hui, et.al.: IROV holographic particle  
image velocimetry for 3D turbulent flow  
measurement. In: Proceedings of the SPIE -  
The International Society for Optical Engineering  
1995, Vol.2546, S.413-419;

**Die folgenden Angaben sind den vom Anmelder eingereichten Unterlagen entnommen**

⑤4 Verfahren zum Messen von Strömungsverhältnissen von Fluiden

(57) Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen von Strömungsverhältnissen von Fluiden, insbesondere einer Ladungsmasse in Zylindern einer Brennkraftmaschine, wobei die Strömung eine Wirbelströmung, insbesondere eine Tumble- und/oder eine Drallströmung ausbildet, und aus aufeinanderfolgenden Momentanaufnahmen der Strömungsverhältnisse jeweilige Strömungsvektoren mit Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Orten bestimmt und daraus Kennzahlen  $K$  der Strömung berechnet werden. Hierbei werden aus den Momentanaufnahmen jeweilige tatsächliche Mittelpunkte der Wirbelströmung ermittelt und die Kennzahlen aus den Strömungsvektoren an den verschiedenen Orten berechnet, wobei zur Berechnung für jeden Ort eines jeweiligen Strömungsvektors ein zugehöriger Ortsvektor verwendet wird, der vom tatsächlichen Mittelpunkt der Wirbelströmung als Ursprung ausgeht.



- [0001]** Die Erfindung betrifft ein Verfahren zum Messen von Strömungsverhältnissen von Fluiden, insbesondere einer Ladungsmasse in Zylindern einer Brennkraftmaschine, wobei die Strömung eine Wirbelströmung, insbesondere eine Tumble- und/oder eine Drallströmung ausbildet, und aus aufeinanderfolgenden Momentanaufnahmen der Strömungsverhältnisse jeweilige Strömungsvektoren mit Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Orten bestimmt und daraus Kennzahlen K der Strömung berechnet werden, gemäß dem Oberbegriff des Anspruchs 1.
- [0002]** In verschiedenen technischen Gebieten ist es erstrebenswert, eine Fluidbewegung in einem abgeschlossenen Raum zu beobachten und zu analysieren. So ist beispielsweise die Ladungsbewegung in einem Brennraum bzw. Zylinder sowohl für Otto- als auch Dieselmotoren ein Parameter, der die Verbrennung und damit die Wirtschaftlichkeit und Leistungsfähigkeit wesentlich beeinflusst. Grundsätzlich wird zwischen Drall, einer Ladungsbewegung um die Zylinderachse, und Tumble, einer Wirbelströmung um eine Achse senkrecht zur Zylinderachse, unterschieden. Meist treten beide Ladungsbewegungen gleichzeitig in verschiedener Form auf.
- [0003]** Aus "Motortechnische Zeitschrift" MTZ 61 (2000) 1, S. 40 ff ist es bekannt, Drall- und Tumblekennzahlen mit Hilfe von mechanisch arbeitenden Aufnahmeverfahren zu ermitteln. Zum Erfassen beider Arten der Ladungsbewegung werden an einem Prüfstand für stationäre Strömung integrative Methoden angewendet. Nachteilig ist jedoch, daß mechanische Hilfsmittel, wie ein Flügelrad oder Momentenmeßgerät, zur Aufnahme von Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit verwendet werden und diese in der zu messenden Strömung selbst angeordnet werden müssen, wodurch die Strömung in unerwünschter Weise beeinflusst wird.
- [0004]** Aus der EP 0 566 120 B1 ist es bekannt, zur Messung der Strömungsverhältnisse u. a. in Brennräumen von Brennkraftmaschinen das sogen. PIV-Verfahren (Particle Image Velocimetry) anzuwenden. Das strömende Fluid enthält hierbei Markierungspartikel (tracer partikels) und das Fluid wird mittels eines kontinuierlichen oder gepulsten Lasers angestrahlt. Dies macht die Fluidverteilung, Strömungsrichtung und -geschwindigkeit mittels der Markierungspartikel sichtbar. Entsprechende Bilder werden aufgenommen und mittels einer Bildverarbeitung ausgewertet. Es werden beispielsweise mit 25 Hz zweidimensionale Bilder in Form von Vektorfeldern aufgenommen und anschließend anhand einer Abfolge von mehreren aufeinanderfolgenden Vektorfeldern die tatsächlichen Strömungsgeschwindigkeiten ermittelt. Bei dem PIV-Verfahren in Verbindung mit Tumble-Messungen wird das dreidimensionale Strömungsfeld im Zylinder auf die zweidimensionale Ebene reduziert, welche im größten Zylinderdurchmesser vorliegt. Für die Ermittlung der Drallzahl wird ein um 90° gedrehtes Meßverfahren angewandt, wobei das Strömungsfeld senkrecht zur Zylindermittelenachse ausgewertet wird. Hierbei mißt beispielsweise eine Kamera senkrecht von unten in den Brennraum.
- [0005]** Bei der anschließenden mathematischen Berechnung eines Tumble- bzw. Drallkennwertes wird jedoch bei allen vorgenannten Verfahren auf einem Ortsfesten Mittelpunkt der Strömung aufgesetzt, welcher aber nur theoretisch gegeben und im tatsächlichen Betrieb nicht an der angenommenen Stelle vorhanden ist. Daher weichen die mit den bekannten Methoden ermittelten Werte zum Teil erheblich von den real vorhandenen Werten ab.
- [0006]** Der vorliegenden Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, ein verbessertes Verfahren der obengenannten Art zur Verfügung zu stellen, wobei die obengenannten Nachteile überwunden werden und eine noch genauere Messung und Charakterisierung von Wirbelströmungen erzielt wird.
- [0007]** Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß durch ein Verfahren der o. g. Art mit den in Anspruch 1 gekennzeichneten Merkmalen gelöst. Vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Ansprüchen angegeben.
- [0008]** Dazu ist es erfindungsgemäß vorgesehen, daß aus den Momentanaufnahmen jeweilige tatsächliche Mittelpunkte der Wirbelströmung ermittelt und die Kennzahlen aus den Strömungsvektoren an den verschiedenen Orten berechnet werden, wobei zur Berechnung für jeden Ort eines jeweiligen Strömungsvektors ein zugehöriger Ortsvektor verwendet wird, der vom tatsächlichen Mittelpunkt der Wirbelströmung als Ursprung ausgeht.
- [0009]** Dies hat den Vorteil, daß eine Bewegung des gesamten Strömungsfeldes in der Betrachtungsebene unkritisch und ohne Einfluß auf das Meßergebnis ist. Das erfindungsgemäße Verfahren benötigt keinen festen Mittelpunkt.
- [0010]** Um die zu messende Strömung selbst so wenig wie möglich zu beeinflussen ist es besonders vorteilhaft, die Momentanaufnahmen mittels eines PIV-Verfahrens (Particle Image Velocimetry) herzustellen.
- [0011]** Eine Kennzahl der Wirbelströmung wird gemäß folgender Formel berechnet:

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{\exp(i)}}{\omega_{\text{mot}}}$$

wobei

5

$$\omega_{\exp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{v}_i(t)}{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i}$$

10

und

15

$$\omega_{\text{mot}} = \frac{V_{\text{mean}}}{2L}$$

und

20

$$V_{\text{mean}} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4}$$

und

25

L: Länge des Zylinders,

D: Durchmesser des Zylinders,

 $r_i$ : Abstand zwischen Meßpunkt i und realer Achse der Wirbelströmung, $\vec{r}_i$ : Ortsvektor des Meßpunktes i ausgehend von der realen Achse O der Wirbelströmung, $\omega_{\exp}$ : Winkelgeschwindigkeit der gesamten Meßfläche,

30

 $\omega_{\text{mot}}$ : Winkelgeschwindigkeit des Motors,

Q: Durchflußwert,

 $V_{\text{mean}}$ : mittlere Geschwindigkeit, folgend aus dem Durchflußwert Q und Zylinderdurchmesser D, $\vec{v}_i$ : Geschwindigkeitsvektor am Meßpunkt i,

n: Anzahl von Meßpunkten in der Meßfläche (Vektorfeld),

35

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern),

K: Kennzahl der Wirbelströmung.

**[0012]** Als Kennzahl K wird eine Tumblezahl T, welche eine Wirbelströmung in einem Zylinder einer Brennkraftmaschine mit Drehachse senkrecht zur Zylinderachse beschreibt, und/oder eine Drallzahl DZ, welche eine Wirbelströmung in einem Zylinder einer Brennkraftmaschine mit Drehachse parallel zur Zylinderachse beschreibt, berechnet.

40

**[0013]** Durch das erfindungsgemäße Verfahren ist die Berechnung einer zusätzlichen charakteristischen Größe bzw. Kennzahl möglich, nämlich die Bestimmung einer Stabilitätszahl S, welche die Bewegung des gesamten Strömungsfeldes beschreibt und gemäß folgender Formel berechnet wird:

$$S = \frac{r_{\text{dev}}}{r_{\text{max}}}$$

45

wobei

$$r_{\text{max}} = \frac{D}{2}$$

50

und

$$r_{\text{dev}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [r_i(t) - r_{\text{mean}}]^2}$$

55

und

$$r_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t)$$

60

und

65

 $r_i$ : Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O, $r_{\text{mean}}$ : mittlerer Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O, $r_{\text{dev}}$ : Abweichung Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O, $r_{\text{max}}$ : maximale Abweichung des Abstands zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,

D: Durchmesser des Zylinders

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern)

S: Stabilitätszahl.

- [0014] Weitere Merkmale, Vorteile und vorteilhafte Ausgestaltungen der Erfindung ergeben sich aus den abhängigen Ansprüchen, sowie aus der nachstehenden Beschreibung der Erfindung anhand der beigefügten Zeichnungen. Diese zeigen in
- [0015] Fig. 1 eine schematische Darstellung eines stationären Prüfstandes für einen Zylinderkopf,
- [0016] Fig. 2 eine graphische Veranschaulichung des Meßprinzips des PIV-Verfahrens (Particle Image Velocimetry),
- [0017] Fig. 3 eine beispielhafte Momentaufnahme eines Meßfeld zur Berechnung einer Tumblezahl,
- [0018] Fig. 4 eine beispielhafte Momentaufnahme eines Meßfeld zur Berechnung einer Drallzahl und
- [0019] Fig. 5 eine beispielhafte Momentaufnahme eines Meßfeld zur Berechnung einer Stabilitätszahl.
- [0020] Nachfolgend wird die Erfindung anhand der Ermittlung von Kennzahlen einer Ladungsmasse in einem Kolben einer Brennkraftmaschine näher beschrieben. Dies ist jedoch lediglich beispielhaft zu verstehen. Das erfindungsgemäße Verfahren ist zur Analyse jeglicher Strömungen geeignet, die eine Wirbelströmung ausbilden.
- [0021] Die Fig. 1 und 2 veranschaulichen das PIV-Verfahren (Particle Image Velocimetry). Wie insbesondere aus Fig. 1 ersichtlich, wird ein Zylinderkopf 10 mit Einlaßkanälen 12 auf einem Prüfstand montiert, der einen Zylinder 14 mit einem feststehenden flachbödigen Kolben (nicht dargestellt) ausbildet. Bei einem konstanten Druckunterschied zwischen dem Eintritt der Einlaßkanäle 12 und dem Zylinder 14 wird eine Kanalströmung in den Zylinder 14 eingeleitet. Mittels einer Kamera 16 wird mit einem PIV-Verfahren, welches nachfolgend unter Bezugnahme auf Fig. 2 näher erläutert wird, ein zweidimensionales Meßfeld 20 aufgenommen. In einem Computer 18 werden an verschiedenen Orten dieses Meßfeldes die entsprechenden Geschwindigkeitsvektoren, d. h. Betrag und Richtung der Geschwindigkeit, analysiert.
- [0022] Wie aus Fig. 2 ersichtlich, wird mittels des PIV-Verfahrens das sich unterhalb des Zylinderkopfes 10 ausbildende Strömungsfeld 26 gemessen. Hierzu strahlt ein Laser 22 durch eine Lichtschnittoptik 24 auf das Strömungsfeld 26, so daß sich ein Lichtschnitt 28 ergibt, der das Strömungsfeld in einer zweidimensionalen Ebene 30, d. h. in einem Beobachtungsfeld 30, für die Kamera 16 sichtbar macht. Die Kamera 16 nimmt dabei das Beobachtungsfeld 30 durch ein Objektiv 32 auf. Für mehrere Zeiten t wird auf diese Weise ein zweidimensionales Meßfeld 20 aufgenommen. Entsprechende Tumble- und Drallzahlen werden in nachfolgend noch näher beschriebener Weise durch numerische Integration der für verschiedene Zeiten t gemessenen zweidimensionalen Meßfeld 20 aus den Geschwindigkeitsvektoren und deren Lage berechnet.
- [0023] Fig. 3 veranschaulicht die Berechnung einer Tumblezahl, welche eine Wirbelströmung um eine Achse senkrecht zu einer Längsachse des Zylinders 14 beschreibt. Der Zylinder weist eine Länge L 34 sowie einen Durchmesser D 36 auf. Hierzu wird der Lichtschnitt 28 gemäß Fig. 2 in einer Ebene parallel zur Längsachse des Zylinders 14 ausgerichtet und zwar am Ort des größten Durchmessers des Zylinders 14, d. h. die Zylinderlängsachse verläuft genau in der Ebene des Lichtschnittes 28. Hierdurch wird die Tumbleströmung im Zylinder 12 erfaßt, die eine Wirbelströmung um eine reale Achse O 38 darstellt, die eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{exp}(t)$  aufweist. Für mehrere Zeiten t werden entsprechende zweidimensionale Meßfelder 20 aufgenommen. An verschiedenen Orten i mit Ortsvektor  $\vec{r}_i(t)$  und endlicher Fläche  $A_i$  wird ein entsprechender Geschwindigkeitsvektor  $\vec{V}_i(t)$  bestimmt. Aus diesen Geschwindigkeitsvektoren  $\vec{V}_i(t)$  wird dann eine Winkelgeschwindigkeit  $\omega_i$  am Meßpunkt i ermittelt. Aus allen Winkelgeschwindigkeiten  $\omega_i$  an den verschiedenen Meßpunkten i ergibt sich dann die Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{exp}(t)$  der gesamten Meßfläche. Das Verhältnis von  $\omega_{exp}(t)$  zu einer Winkelgeschwindigkeit  $\omega_{mot}$  der Brennkraftmaschine ergibt dann die Tumblezahl.
- [0024] Die Berechnung der Tumblezahl erfolgt nach folgenden Formeln:

$$V_{mean} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4}$$

$$\omega_{mot} = \frac{V_{mean}}{2L}$$

$$\omega_{exp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{V}_i(t)}{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i}$$

$$T = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{exp}(t)}{\omega_{mot}}$$

wobei

L: Länge des Zylinders,

D: Durchmesser des Zylinders,

$r_i$ : Abstand zwischen Meßpunkt i und realer Achse der Wirbelströmung,

$\vec{r}_i$ : Ortsvektor des Meßpunktes i ausgehend von der realen Achse O der Wirbelströmung,

$\omega_{exp}$ : Winkelgeschwindigkeit der gesamten Meßfläche,

$\omega_{mot}$ : Winkelgeschwindigkeit des Motors,

Q: Durchflußwert,

$V_{mean}$ : mittlere Geschwindigkeit, folgend aus dem Durchflußwert Q und Zylinderdurchmesser D,

$\vec{v}_i$ : Geschwindigkeitsvektor am Meßpunkt i,

n: Anzahl von Meßpunkten in der Meßfläche (Vektorfeld),

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern),

T: Tumble.

[0025] Das außergewöhnliche an dem erfindungsgemäße Verfahren liegt darin, daß im Gegensatz zu herkömmlichen Berechnungsverfahren nicht eine vorbestimmte, feststehende ideale Drehachse als Ursprung für die Ortsvektoren  $\vec{r}_i(t)$  verwendet wird, sondern statt dessen derjenige Punkt O 38 in dem jeweiligen zweidimensionalen Meßfeld 20, bei dem die reale Drehachse der Tumbleströmung das zweidimensionale Meßfeld 20 schneidet.

[0026] In analoger Weise wird die Drallzahl DZ gemäß der Darstellung in Fig. 4 ermittelt, so daß zur näheren Erläuterung auf die obige Beschreibung der Fig. 3 verwiesen wird. Im Unterschied zur Ermittlung der Tumblezahl T gemäß Fig. 3 ist der Lichtschnitt senkrecht zur Längsachse des Zylinders 14 ausgerichtet, so daß eine Wirbelströmung (Drall) des Fluides um eine Achse aufgenommen wird, die parallel zur Zylinderlängsachse verläuft.

[0027] Die Berechnung der Drallzahl erfolgt nach folgenden Formeln:

$$V_{mean} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} \quad 20$$

$$\omega_{mot} = \frac{V_{mean}}{2L} \quad 25$$

$$\omega_{exp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{v}_i(t)}{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i} \quad 30$$

$$DZ = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{exp(t)}}{\omega_{mot}} \quad 35$$

wobei

L: Länge des Zylinders,

D: Durchmesser des Zylinders,

$r_i$ : Abstand zwischen Meßpunkt i und realer Achse der Wirbelströmung,

$\vec{r}_i$ : Ortsvektor des Meßpunktes i ausgehend von der realen Achse O der Wirbelströmung,

$\omega_{exp}$ : Winkelgeschwindigkeit der gesamten Meßfläche,

$\omega_{mot}$ : Winkelgeschwindigkeit des Motors,

Q: Durchflußwert,

$V_{mean}$ : mittlere Geschwindigkeit, folgend aus dem Durchflußwert Q und Zylinderdurchmesser D,

$\vec{v}_i$ : Geschwindigkeitsvektor am Meßpunkt i,

n: Anzahl von Meßpunkten in der Meßfläche (Vektorfeld),

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern),

DZ: Drallzahl.

[0028] Wiederum wird als Ursprung für die Ortsvektoren  $\vec{r}_i(t)$  derjenige Punkt O 38 in dem jeweiligen zweidimensionalen Meßfeld 20 gewählt, bei dem die reale Drehachse der Drallströmung das zweidimensionale Meßfeld 20 schneidet.

[0029] Zusätzlich wird durch das erfindungsgemäße Verfahren die Berechnung einer zusätzlichen Kenngröße möglich, nämlich der Stabilitätszahl, die die Bewegung des gesamten Strömungsfeldes beschreibt.

[0030] Die Berechnung der Stabilitätszahl S erfolgt nach folgenden Formeln:

$$S = \frac{r_{dev}}{r_{max}}$$

$$r_{max} = \frac{D}{2}$$

$$r_{dev} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [r_i(t) - r_{mean}]^2}$$

$$r_{mean} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t)$$

wobei

$r_i$ : Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,

$r_{mean}$ : mittlerer Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,

$r_{dev}$ : Abweichung Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,

$r_{max}$ : maximale Abweichung des Abstands zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,

D: Durchmesser des Zylinders

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern)

S: Stabilitätszahl.

[0031] Hierbei entspricht der Ursprung O 40 der idealen Wirbelachse. In der Fig. 5 repräsentieren die Kreuze die verschiedenen realen Drehachsen in den zeitlich beabstandet aufgenommenen zweidimensionalen Meßfeldern. Es wird ein Mittelwert aller Abweichungen der realen Wirbelachsen von der idealen Wirbelachsen gebildet. Das Verhältnis dieses Mittelwertes zu einem maximalen Abstand ergibt die Stabilitätszahl S.

#### BEZUGSZEICHENLISTE

- 10 Zylinderkopf
- 12 Einlaßkanal
- 14 Zylinder
- 16 Kamera
- 18 Computer
- 20 zweidimensionales Meßfeld
- 22 Laser
- 24 Lichtschnittoptik
- 26 Strömungsfeld
- 28 Lichtschnitt
- 30 zweidimensionalen Ebene/Beobachtungsfeld
- 32 Objektiv
- 34 Länge L
- 36 Durchmesser D
- 38 reale Achse der Tumbleströmung
- 40 Ursprung für Stabilitätszahl
- DZ Drallzahl
- K Kennzahl
- T Tumblezahl

#### Patentansprüche

1. Verfahren zum Messen von Strömungsverhältnissen von Fluiden, insbesondere einer Ladungsmasse in Zylindern einer Brennkraftmaschine, wobei die Strömung eine Wirbelströmung, insbesondere eine Tumble- und/oder eine Drallströmung ausbildet, und aus aufeinanderfolgenden Momentanaufnahmen der Strömungsverhältnisse jeweilige Strömungsvektoren mit Strömungsrichtung und Strömungsgeschwindigkeit an verschiedenen Orten bestimmt und daraus Kennzahlen K der Strömung berechnet werden, **dadurch gekennzeichnet**, daß aus den Momentanaufnahmen jeweilige tatsächliche Mittelpunkte der Wirbelströmung ermittelt und die Kennzahlen aus den Strömungsvektoren an den verschiedenen Orten berechnet werden, wobei zur Berechnung für jeden Ort eines jeweiligen Strömungsvektors ein zugehöriger Ortsvektor verwendet wird, der vom tatsächlichen Mittelpunkt der Wirbelströmung als Ursprung ausgeht.
2. Verfahren nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Momentanaufnahmen mittels eines PIV-Verfahrens (Particle Image Velocimetry) hergestellt werden.

3. Verfahren nach Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß eine Kennzahl der Wirbelströmung gemäß folgender Formel berechnet wird,

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{\omega_{\exp}(t)}{\omega_{\text{mot}}} \quad 5$$

wobei

$$\omega_{\exp}(t) = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \times \vec{v}_i(t)}{\sum_{i=1}^n \vec{r}_i \cdot \vec{r}_i} \quad 10$$

und

$$\omega_{\text{mot}} = \frac{V_{\text{mean}}}{2L} \quad 15$$

und

$$V_{\text{mean}} = \frac{Q}{\pi D^2 / 4} \quad 20$$

und

L: Länge des Zylinders,

D: Durchmesser des Zylinders,

$r_i$ : Abstand zwischen Meßpunkt i und realer Achse der Wirbelströmung,

$\vec{r}_i$ : Ortsvektor des Meßpunktes i ausgehend von der realen Achse O der Wirbelströmung, 30

$\omega_{\exp}$ : Winkelgeschwindigkeit der gesamten Meßfläche,

$\omega_{\text{mot}}$ : Winkelgeschwindigkeit des Motors,

Q: Durchflußwert,

$V_{\text{mean}}$ : mittlere Geschwindigkeit, folgend aus dem Durchflußwert Q und Zylinderdurchmesser D,

$\vec{v}_i$ : Geschwindigkeitsvektor am Meßpunkt i, 35

n: Anzahl von Meßpunkten in der Meßfläche (Vektorfeld),

N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern),

K: Kennzahl der Wirbelströmung.

4. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß als Kennzahl K eine Tumblezahl T, welche eine Wirbelströmung in einem Zylinder einer Brennkraftmaschine mit Drehachse senkrecht zur Zylinderachse beschreibt, und/oder eine Drallzahl DZ, welche eine Wirbelströmung in einem Zylinder einer Brennkraftmaschine mit Drehachse parallel zur Zylinderachse beschreibt, berechnet wird. 40

5. Verfahren nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß zusätzlich eine Stabilitätszahl S berechnet wird gemäß der Formel, 45

$$S = \frac{r_{\text{dev}}}{r_{\text{max}}} \quad 45$$

wobei

$$r_{\text{max}} = \frac{D}{2} \quad 50$$

und

$$r_{\text{dev}} = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N [r_i(t) - r_{\text{mean}}]^2} \quad 55$$

und

$$r_{\text{mean}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N r_i(t) \quad 60$$

und

$r_i$ : Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O, 65



## DE 100 38 460 A 1

$r_{\text{mean}}$ : mittlerer Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,  
 $r_{\text{dev}}$ : Abweichung Abstand zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,  
 $r_{\text{max}}$ : maximale Abweichung des Abstands zwischen realer Wirbelachse i und idealer Wirbelachse O,  
D: Durchmesser des Zylinders  
N: Anzahl von gemessenen Meßflächen (Vektorfeldern)  
S: Stabilitätszahl.

---

Hierzu 2 Seite(n) Zeichnungen

---

10

15

20

25

30

35

40

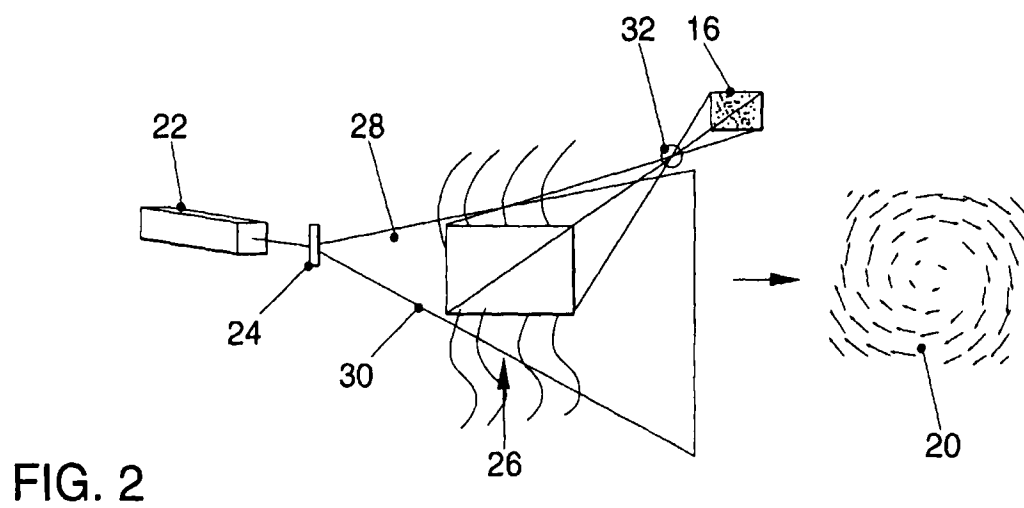
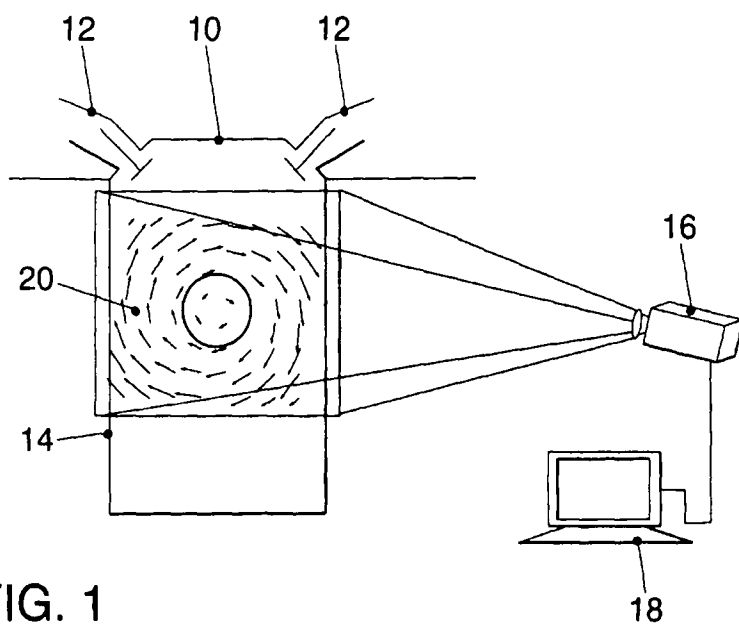
45

50

55

60

65



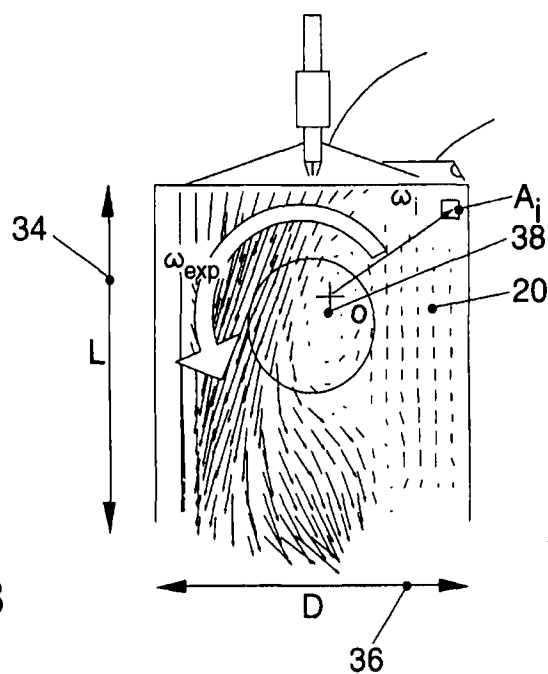


FIG. 3

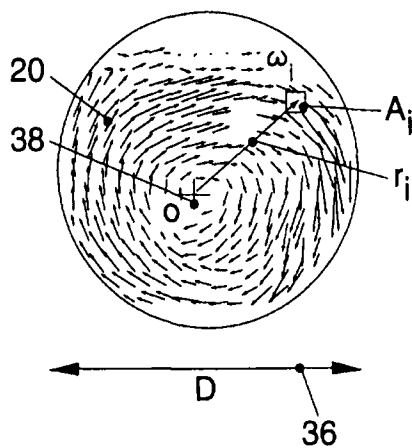


FIG. 4

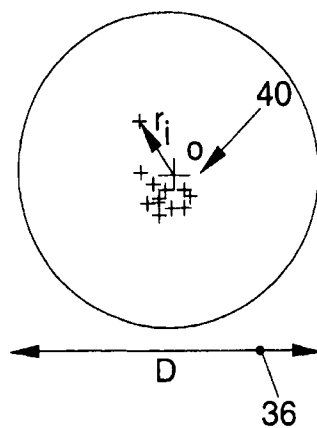


FIG. 5